

# **ELECTRICALLY CONTROLLABLE LIGHT MODULATOR HAVING A MATERIAL COMPOSITION BASED ON NANOPARTICLES THAT ARE EMBEDDED IN ELECTRO-OPTICAL MEDIA**

Publication number: DE10135114

Publication date: 2003-02-13

Inventor: FELDMANN JOCHEN (DE); SOENNICHSEN CARSTEN (DE); PLESSER GERO VON (DE); PERNER MARTIN (DE); JAKAB ARPAD (DE)

Applicant: LUDWIG MAXIMILIANS UNI MUENCHEN (DE)

Classification:

- international:

C09K19/52; G02F1/03; G02F1/137; G02F1/1333;  
C09K19/52; G02F1/01; G02F1/13; (IPC1-7):  
C09K19/02; A61F9/02; C09K9/00; G02F1/01; G02F1/13

- European:

C09K19/52; G02F1/03; G02F1/137; Y01N10/00

Application number: DE20011035114 20010719

Priority number(s): DE20011035114 20010719

Also published as:



WO03009058 (A3)

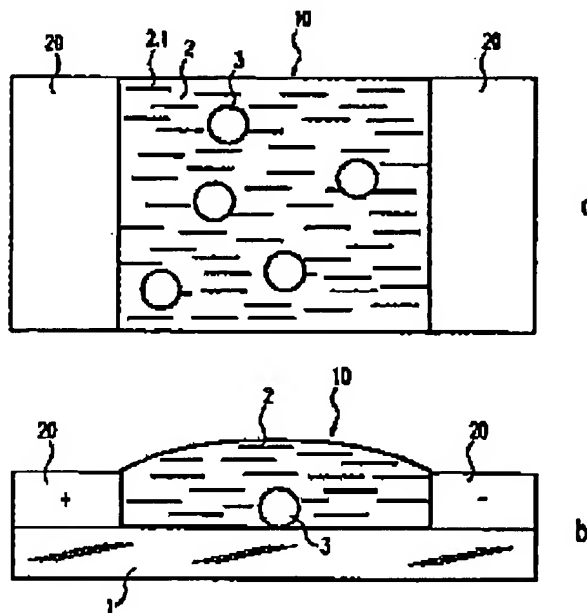
WO03009058 (A2)

Report a data error here

Abstract not available for DE10135114

Abstract of corresponding document: WO03009058

A layer (10) of a material composition comprises a medium (2), which is transparent to electromagnetic radiation in an area and inside of which a single or a number of particles (3) is/are embedded that are created so that their frequency-dependent response to the irradiation of electromagnetic radiation has at least one resonance, particularly a plasmon resonance, whereby the medium (2) has an anisotropy of the refractive index that can be induced or altered by an electric field. The electric field generated by two electrodes (20) permits the plasmon resonance to be shifted and thus the production of an electrically controllable light modulation, particularly light scatter or light reflection and light absorption.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide



① BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 101 35 114 A 1**

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**C 09 K 19/02**  
C 09 K 9/00  
G 02 F 1/01  
G 02 F 1/13  
A 61 F 9/02

② Aktenzeichen: 101 35 114.3  
② Anmeldetag: 19. 7. 2001  
④ Offenlegungstag: 13. 2. 2003

DE 101 35 114 A 1

⑦ Anmelder:

Ludwig-Maximilians-Universität München  
(Körperschaft des öffentlichen Rechts), 80539  
München, DE

⑦ Vertreter:

Patentanwälte Dr. Graf Lambsdorff & Dr. Lange,  
81673 München

⑦ Erfinder:

Feldmann, Jochen, 85238 Petershausen, DE;  
Sönnichsen, Carsten, 80798 München, DE; Plessen,  
Gero von, 82110 Germering, DE; Perner, Martin, Dr.,  
81377 München, DE; Jakob, Arpad, 80805  
München, DE

⑥ Entgegenhaltungen:

DE 196 30 538 A1  
US 56 45 758 A1  
WO 90 11 890 A1

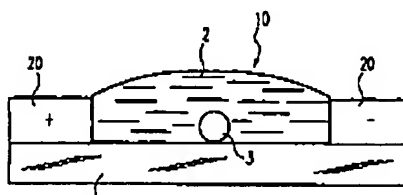
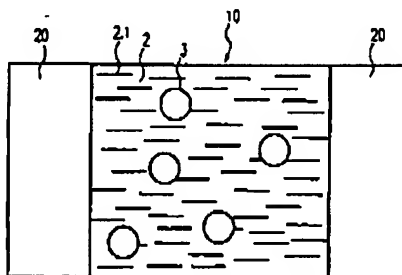
Chemie in unserer Zeit (1984) 5, 168-176;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑥ Elektrisch steuerbarer Lichtmodulator mit einer Materialzusammensetzung basierend auf in elektrooptischen Medien eingebetteten Nanopartikeln

⑦ Eine Schicht (10) einer Materialzusammensetzung weist ein Medium (2), auf, welches in einem Bereich elektromagnetischer Strahlung transparent ist, und in welchem ein einzelnes oder eine Mehrzahl Partikel (3) eingebettet ist, welche derart beschaffen sind, daß ihre frequenzabhängige Antwort auf die Einstrahlung elektromagnetischer Strahlung mindestens eine Resonanz, insbesondere eine Plasmonenresonanz, aufweist, wobei das Medium (2) eine durch ein elektrisches Feld induzierbare oder veränderbare Anisotropie des Brechungsindex aufweist. Durch das von zwei Elektroden (20) erzeugte elektrische Feld läßt sich die Plasmonenresonanz verschieben und damit eine elektrisch steuerbare Lichtmodulation, insbesondere Lichtstreuung bzw. -reflexion und Lichtabsorption herbeiführen.



DE 101 35 114 A 1

## DE 101 35 114 A 1

1

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich im allgemeinen auf das Gebiet elektrisch steuerbarer Lichtmodulatoren. Insbesondere betrifft die Erfindung dabei eine Materialzusammensetzung nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung, in welcher eine derartige Materialzusammensetzung enthalten und ein diese Materialzusammensetzung durchsetzendes elektrisches Feld erzeugbar ist. Eine derartige Vorrichtung kann als ein elektrisch steuerbarer Lichtmodulator, insbesondere in der Form eines Lichtstreuers oder Lichtabsorbers, eingesetzt werden und beispielsweise bei Lichtwellenleitern oder Bildschirmen zur Anwendung kommen.

[0002] In vielen technologischen Bereichen spielt Licht eine immer wichtigere Rolle. Insbesondere auf den Gebieten der Beleuchtung, der Übertragung von Daten (Telekommunikation, Internet, etc.) und der Sichtbarmachung von Informationen mittels Bildschirmen (Monitore, Anzeigevorrichtungen für Mobiltelefone und andere elektronische Geräte) sowie der Diagnostik und Sensorik (insbesondere für Anwendungen in der Biotechnologie) kommt optischen Technologien eine ständig steigende Bedeutung zu. In allen genannten Bereichen kommt es entscheidend darauf an, die Eigenschaften des Lichts wie Intensität, Frequenz, Phase, Polarisation und Ausbreitungsrichtung kontrollieren zu können. Bei der Beleuchtung möchte man z. B. Farbeindruck, Helligkeit und Streueigenschaften von Oberflächen und transparenten Materialien manipulieren, während man bei der optischen Kommunikation verschiedenen Wellenlängen des Lichts Informationsauftrag aufträgt und diese mittels Glasfasern über z. T. riesige Entfernungen transportiert und dann dekodiert. Bei farbigen Displays kommt es entscheidend darauf an, jedes aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau bestehendes Pixelelement eines Pixelfeldes dazu zu bewegen, jede Farbe mit einstellbarer Intensität in möglichst alle Richtungen abzusenden.

[0003] Die Kontrolle all dieser Lichteigenschaften in den verschiedenen Anwendungsbereichen erfolgt in der Regel auf elektrischem Wege. Bauelemente, die über Anlegen einer Spannung oder Zuführung von Strom Lichteigenschaften ändern bzw. Licht erzeugen können, werden allgemein als optoelektronische oder elektrooptische Bauelemente bezeichnet. Diese werden in den meisten Fällen aus anorganischen Halbleitermaterialien und seit einigen Jahren zunehmend auch aus organischen Materialien hergestellt.

[0004] Die meisten optoelektronischen Bauelemente beruhen auf Änderungen der Lichtabsorption (Elektroabsorption) oder des Brechungsindex (elektrorefraktive bzw. elektrooptische Effekte). Ein bekanntes und bereits kommerziell erhältliches Beispiel ist das der "schaltbaren Fenster" ("switchable windows"). Durch Anlegen einer elektrischen Spannung können Fensterscheiben von dem normalen diffusen Streuzustand in einen transparenten Zustand geschaltet werden. Hierzu werden z. B. Tropfen aus Flüssigkristallen in einer Polymermatrix zwischen zwei leitenden Glasplatten durch ein elektrisches Feld ausgerichtet, wie es beispielsweise in der US-A-6,215,535 beschrieben ist.

[0005] Alternativ können auch Polymerpartikel verwendet werden, die in einem Flüssigkristall dispergiert sind; der diffuse Streuzustand wird dann durch eine Domänenbildung im Flüssigkristall verursacht, welche durch die Polymerpartikel ausgelöst wird; der transparente Zustand wird durch Ausrichtung des Flüssigkristalls im elektrischen Feld erreicht. Im Hinblick auf den kommerziellen Einsatz konkurrieren solche elektrisch steuerbaren Lichtstreuere beispielsweise mit elektrochromen Materialien, bei denen sich als Folge einer elektrisch schaltbaren chemischen Reaktion die

2

Farbe des Materials ändern lässt. Die Möglichkeit der Einbettung von Partikeln in Flüssigkristallen hat auch zu grundlagenorientierten theoretischen Untersuchungen der Lichtstreuungseigenschaften von Partikeln geführt, die in optisch anisotropen Medien eingebettet sind.

[0006] Aus der US-A-5,645,758 ist beispielsweise eine Materialzusammensetzung und ein aus dieser aufgebaute Lichtmodulator bekannt, bei welchen in ein flüssigkristallines Material Partikel eingebettet sind, die zu den flüssigkristallinen Molekülen eine chemische Affinität aufweisen und deren Ausdehnung zwischen 0,1 und 20 µm und deren Aspektverhältnis (Länge zu Breite) größer als 2 ist. Dabei sind die Partikel in der Materialzusammensetzung in einer Menge vorhanden, durch die es erwünschtermaßen zur Ausbildung einer Vielfach-Domänenstruktur mit zufälliger Verteilung der Ausrichtung der flüssigkristallinen Moleküle kommt. Bei Anlegen eines elektrischen Feldes können die flüssigkristallinen Moleküle und mit ihnen die Partikel entlang der elektrischen Feldlinien ausgerichtet werden und damit ein für Licht bestimmter Wellenlänge transparenter Zustand herbeigeführt werden. Bei Abschalten des elektrischen Feldes wird dieser Zustand zunächst beibehalten ("gespeichert") und kann lediglich durch Beaufschlagung mit einer Temperatur, bei der der Flüssigkristall einen isotropen Zustand einnimmt, wieder in den Ausgangszustand zurückversetzt werden.

[0007] In der gattungsbildenden US-A-5,023,139 werden die Eigenschaften von Partikeln, insbesondere Partikeln mit nanoskopischen Ausmaßen (in der Druckschrift genannter mittlerer Durchmesser  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  m) beschrieben, die einen Kern und mindestens eine Schale aufweisen, wobei mindestens der Kern oder eine der Schalen durch ein Metall gebildet sind und mindestens der Kern oder eine der Schalen aus einem dielektrischen Material gebildet sind, welches ein nichtlineares Antwortverhalten dritter Ordnung ( $\chi^{(3)}$ -Beitrag der nichtlinearen Polarisation) aufweist. In einer Ausführungsform bestehen die Partikel lediglich aus Metall und sind in ein umgebendes dielektrisches Material ("Schale") eingebettet. Das Metall der Partikel weist eine Plasmonenresonanz auf, deren Stärke und relative Lage auf der Frequenzskala in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie dem Verhältnis zwischen dem Kernradius und dem Radius der ersten inneren Schale dargestellt werden.

[0008] Hinsichtlich potentieller Anwendungen der im Stand der Technik realisierten oder vorgeschlagenen elektrisch steuerbaren Lichtmodulatoren bestehen jedoch noch die folgenden Probleme:

1. Lichtsignale in Wellenleitern können in ihrer Intensität von außen nicht einfach kontrolliert werden.
2. Fläche, großflächige, leichte, biegsame und farbige Bildschirme lassen sich bisher nicht zu vertretbaren Preisen herstellen.
3. Die integrierte Optik und Mikrooptik verlangt nach neuen Bauelementen, die es erlauben, Lichtsignale aus Wellenleitern der unterschiedlichsten Geometrie räumlich und spektral selektiv auskoppeln zu können. Hierzu sind Bauelemente nötig, die sich jeder Geometrie anpassen lassen (keine herkömmlichen anorganischen Kristalle).
4. Für Zwecke der Raumbelichtung werden elektrisch schaltbare Fenster und Streuscheiben benötigt, die neben der Lichthelligkeit auch den Farbeindruck regeln lassen.
5. Räumliche Lichtmodulatoren unterscheiden in der Regel nicht gezielt zwischen verschiedenen Lichtwellenlängen.

## DE 101 35 114 A 1

3

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Materialzusammensetzung und eine daraus herstellbare Vorrichtung wie einen elektrisch steuerbaren Lichtmodulator anzugeben, mit denen es möglich ist, die Streuung und die Absorption von Licht einer bestimmten Wellenlänge oder eines bestimmten Wellenlängenbereichs elektrisch zu steuern bzw. ein- und auszuschalten. Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, geeignete Bauelemente anzugeben, mit welchen die oben angesprochenen Probleme gelöst werden können.

[0010] Die erstgenannte Aufgabe wird durch eine Materialzusammensetzung nach den kennzeichnenden Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Die weitere Aufgabe wird durch die darauf rückbezogenen abhängigen Ansprüche gelöst. Weitere vorteilhafte Weiterbildungen und Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0011] Ein wesentlicher Gedanke der Erfindung liegt darin, in einer Materialzusammensetzung mindestens ein Partikel, welches eine Resonanz aufweist, die vorzugsweise im lichtoptischen Spektralbereich oder in seiner Nähe liegt und weiterhin vorzugsweise durch eine Plasmonenresonanz gebildet ist, in ein Medium einzubetten, welches eine durch den Einfluß eines elektrischen Feldes induzierbare oder veränderbare Anisotropie des Brechungsindex aufweist.

[0012] Das (Einbettungs-)Medium soll also derart beschaffen sein, daß durch ein das Medium durchdringendes elektrisches Feld eine ohne elektrisches Feld nicht vorhandene optische Doppelbrechung induziert oder eine ohne elektrisches Feld bereits vorhandene Doppelbrechung in ihrer Stärke und/oder Ausrichtung verändert wird. Durch das Anlegen des elektrischen Feldes verschiebt sich aufgrund der Änderung und Aufspaltung der Dielektrizitätskonstanten in eine parallel und eine senkrecht zur optischen Achse polarisierte Komponente die plasmonische Resonanz der Partikel auf der Frequenz- oder Wellenlängensache, wodurch eine eingestrahelte elektromagnetische Welle mit einer Wellenlänge, bei der das Medium im wesentlichen transparent ist, je nach der eingetretenen Veränderung entweder stärker oder weniger stark von den Partikeln gestreut und absorbiert wird.

[0013] Die Materialzusammensetzung kann eine Mehrzahl von Partikeln aufweisen, die in das Medium eingebettet sind. Es ist jedoch auch denkbar, daß lediglich ein einzelnes Partikel der beschriebenen Art in dem Medium eingebettet ist.

[0014] Für das Medium kommen verschiedene Materialien in Frage. Beispielsweise bieten organische Materialien prinzipiell den Vorteil, mit einfachen Methoden und daher kostengünstig großflächige und prinzipiell auch mechanisch biegsame Bauelemente herstellen zu können. Als besonders geeignete Medien können Flüssigkristalle angesehen werden, da sich in bisher unveröffentlichten Experimenten der Erfinder gezeigt hat, daß sich die plasmonische Streuresonanz von beispielsweise Silber-Nanopartikeln drastisch in der Wellenlänge verschieben läßt, wenn man sie in einen Flüssigkristall einbettet und an diesen ein elektrisches Feld anlegt. Durch das angelegte elektrische Feld werden die flüssigkristallinen Moleküle ausgerichtet, wodurch ein stark anisotroper Brechungsindex und somit eine polarisationsabhängige spektrale Verschiebung der Plasmonenresonanz hervorgerufen wird.

[0015] Unter derzeitigen wirtschaftlichen Gesichtspunkten können Flüssigkristalle auch als die wichtigste organische Materialklasse angesehen werden, da sich mit ihnen durch Ausnutzung ihrer polarisierenden Eigenschaften Flachbildschirme und Lichtmodulatoren herstellen lassen. Darüber hinaus werden zur Zeit mittels Flüssigkristall-Bragg-Gittern Bauelemente entwickelt, die die Wellenlänge

4

und die Abschwächung von Lichtsignalen in Wellenleitern regeln können. Diese Bauelemente sollen zur Signalmultiplexierung von Wavelength Division Multiplexing (WDM)-Signalen eingesetzt werden.

[0016] Anstelle von Flüssigkristallen kann das Medium jedoch auch beliebig andersgeartet durch das elektrische Feld ausrichtbare Moleküle aufweisen.

[0017] Als Medien kommen desweiteren auch anorganische elektrooptische Materialien, insbesondere ferroelektrische Kristalle wie z. B.  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$  und KDP in Frage.

[0018] Die in das elektrooptische Material eingebetteten Partikel sollen in ihrer frequenzabhängigen Antwort auf die Einstrahlung elektromagnetischer Strahlung – insbesondere im lichtoptischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums eine Resonanz, vorzugsweise eine Plasmonenresonanz, aufweisen. Die Partikel enthalten demzufolge beispielsweise entweder ein Metall, einen stark dotierten Halbleiter oder einen Supraleiter, wobei auch vorstellbar ist, daß die Partikel einen Aufbau besitzen, in dem eine Kombination aus diesen Materialien verwendet wird. In einer bevorzugten Ausführungsform sind die Partikel zur Gänze aus einem Metall, insbesondere aus Gold, Silber, Kupfer oder aus Alkalimetallen zusammengesetzt.

[0019] Die Partikel sind ferner vorzugsweise als sogenannte Nanopartikel ausgebildet, womit hier ein Bereich eines mittleren Partikeldurchmessers von 1–1000 nm, insbesondere 1–500 nm, insbesondere 1–200 nm, insbesondere 1–100 nm gemeint sein soll. Durch Nanopartikel dieser Größe, die beispielsweise aus Silber oder Gold hergestellt werden, können Plasmonenresonanzen bereitgestellt werden, die beispielsweise im ultravioletten, sichtbaren oder infraroten Spektralbereich liegen und daher für Anwendungszwecke besonders von Interesse sind.

[0020] Die eingesetzten Partikel weisen bevorzugtermaßen eine sphärische, ellipsoidale oder stäbchenförmige Form auf.

[0021] In einer einfachen Vorrichtung, in der ein die Materialzusammensetzung durchsetzendes elektrisches Feld bereitgestellt wird, können beispielsweise zwei voneinander beabstandete Elektroden angeordnet und in deren Zwischenraum die Materialzusammensetzung eingefüllt werden. Auf einem gemeinsamen für die zu modulierende Wellenlänge transparenten Substrat können sowohl die Materialzusammensetzung als auch lateral davon die beiden Elektroden abgeschieden werden. Die Elektroden werden an eine Spannungsquelle angeschlossen.

[0022] Die Elektroden können auch auf die als Schicht abgeschiedene Materialzusammensetzung aufgebracht werden, ohne mit dem Substrat in Kontakt zu stehen, wobei das sich zwischen den Elektroden ausbildende elektrische Feld die Materialzusammensetzung nur zum Teil durchdringt.

[0023] Diese einfache Vorrichtung kann allgemein als Lichtmodulator verwendet werden, in dem die Absorption, Streuung oder Reflexion einer elektromagnetischen Welle in Abhängigkeit von dem angelegten elektrischen Feld in einer gewünschten Weise moduliert werden kann. Die Lichtmodulation beruht darauf, daß sich bei einer Änderung des angelegten elektrischen Feldes die Plasmonenresonanz in bezug zu der relativen Lage der Wellenlänge der eingestrahelten elektromagnetischen Welle verändert und somit durch die elektromagnetische Welle die plasmonische Schwingung in den Partikeln stärker oder schwächer angeregt wird. Damit wird die elektromagnetische Welle entsprechend stärker oder schwächer von den Partikeln absorbiert. Da durch die angeregte plasmonische Schwingung wiederum eine elektromagnetische Welle emittiert wird, wird die ursprüngliche elektromagnetische Welle entsprechend stärker oder schwächer von den Partikeln gestreut bzw. reflektiert.

## DE 101 35 114 A 1

5

[0024] Eine derartige Vorrichtung kann beispielsweise als elektrisch steuerbarer Lichtmodulator in einen Wellenleiter eingesetzt werden, um darin das Licht einer in dem Wellenleiter geführten elektromagnetischen Welle gezielt herauszustreuen. In diesem Fall wirkt der Lichtmodulator als ein Lichtstreuer.

[0025] Es kann ferner ein monochromer oder vollfarbtauglicher Bildschirm hergestellt werden, indem eine Matrix von Pixelelementen, die jeweils durch einen oder mehrere erfindungsgemäße elektrisch steuerbare Lichtstreuer aufgebaut sind, auf einem optisch transparenten Substrat aufgebracht werden. Die Pixelelemente können in an sich bekannter Weise separat voneinander angesteuert und mit elektrischen Spannungen beaufschlagt werden. Von den Seitenkanten oder von der Unterseite in das Substrat eingekoppeltes Licht wird dann für jedes Pixel je nach der vorhandenen Spannung aus der Ebene des Substrats herausgestreut und addiert sich bei Betrachtung von einer bestimmten Entfernung zu einem gewünschten Gesamtbild. Bei einem monochromen Bildschirm wird Licht einer bestimmten Farbe in das Substrat eingekoppelt. Bei einem vollfarbtauglichen Bildschirm besteht dagegen jedes Pixelelement aus drei Subpixeln für die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau. In das Substrat werden diese drei Farben, die beispielsweise von LEDs oder Laserdioden emittiert werden, eingekoppelt und die drei Subpixel sind derart als erfindungsgemäße elektrisch steuerbare Lichtstreuer konzipiert, daß sie von den eingekoppelten drei Grundfarben je nach angelegter Spannung entweder das rote, das grüne oder das blaue Licht aus der Substratebene herausstreuen.

[0026] Eine weitere Anwendung besteht in einer Substratscheibe, beispielsweise Glas- oder Kunststoffscheibe, in der eine erfindungsgemäße Vorrichtung als elektrisch steuerbarer Lichtstreuer integriert ist, und in der ein elektrisch steuerbarer Farbeffekt hervorgerufen werden kann. Zu diesem Zweck kann beispielsweise auf einer Hauptoberfläche einer transparenten oder semitransparenten Substratscheibe eine Schicht der Materialzusammensetzung aufgebracht werden und zu beiden Seiten eines gewünschten Schichtabschnitts können die Elektroden auf das Substrat oder lediglich auf die Schicht aufgebracht werden. Abhängig von der angelegten Spannung erscheint das transmittierte Licht aufgrund der Verschiebung der Plasmonenresonanz dem Betrachter in zwei verschiedenen Farben. Es kann dabei vorgesehen sein, daß sich die Plasmonenresonanz bei Anlegen des elektrischen Feldes innerhalb des sichtbaren Spektrums verschiebt oder daß sie sich aus einem Bereich außerhalb des sichtbaren Spektrums in den sichtbaren Bereich hinein oder umgekehrt verschiebt.

[0027] Nachfolgend wird die Erfindung anhand der Zeichnungen näher erläutert, in denen Ausführungsbeispiele dargestellt sind. Es zeigen:

[0028] Fig. 1a, b eine Draufsicht und eine Seitenansicht einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

[0029] Fig. 2a, b Lichtstreuungsspektren von Silber-Nanopartikeln;

[0030] Fig. 3 Abhängigkeit des energetischen Plasmonenresonanzniveaus von dem Polarisationswinkel der elektromagnetischen Strahlung;

[0031] Fig. 4 ein Wellenleiter mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

[0032] Fig. 5 ein polychromer Bildschirm mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

[0033] Fig. 6 eine partielle Querschnittsansicht einer weiteren Ausführungsform eines Bildschirms mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

[0034] Fig. 7 eine (Fenster-)Glasscheibe mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

6

[0035] In der Fig. 1 ist zunächst eine einfache Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung in einer Draufsicht (a) und einer Seitenansicht (b) abgebildet, die als elektrisch steuerbarer Lichtstreuer eingesetzt werden kann.

[0036] Die Vorrichtung ist auf einem als Substrat 1 dienenden Mikroskop-Deckglas aufgebracht und weist eine Schicht 10 eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Materialzusammensetzung und zwei Elektroden 20 auf, die ebenfalls auf dem Substrat 1 abgeschieden sind und zwischen denen die Materialzusammensetzung angeordnet ist. Vorzugsweise stehen die Elektroden an den Seiten der Materialzusammensetzungsschicht 10 mit dieser in Kontakt. Dies ist jedoch nicht zwingend. Da die Schicht 10 lediglich von einem zwischen den Elektroden 20 erzeugten elektrischen Feld durchsetzt werden soll, jedoch kein elektrischer Strom fließen soll, ist theoretisch auch denkbar, zwischen den Elektroden 20 und der Schicht 10 einen Abstand zu lassen, etwa falls die Materialzusammensetzung nicht mit dem Elektrodenmaterial verträglich ist.

[0037] Bei dem vorliegenden Ausführungsbeispiel basiert die Materialzusammensetzung auf dem als Medium 2 dienenden nematischen Flüssigkristall mit der Bezeichnung B7 (Hersteller Merck), der in Fig. 1 durch Flüssigkristallmoleküle 2.1 angedeutet ist. In den Flüssigkristall 2 sind im wesentlichen sphärisch geformte nanoskopische Silberpartikel 3 eingebettet, von denen symbolhaft eine geringe Anzahl in der Fig. 1 dargestellt ist.

[0038] Die Materialzusammensetzung wird dadurch hergestellt, indem zunächst in Wasser dispergierte kommerziell erhältliche Silberpartikel 3 mit einem mittleren Durchmesser von 60 nm durch Schleuderguß auf dem Mikroskop-Deckglas 1 aufgebracht werden. Nach einer Trocknung wird dann eine flüssigkristalline Schicht des Flüssigkristalls 2 (B7) durch Schleuderguß auf die Probe aufgebracht. Vorher wurden Elektroden 20 aus Gold mit einer Dicke von 100 nm auf das Substrat 1 mit einem Abstand von 200 µm aufgedampft, so daß sich zwischen ihnen die Materialzusammensetzung befindet. Es werden elektrische Felder von typischerweise  $F = 2 \times 10^4$  V/cm zwischen den Elektroden 20 angelegt, um die Flüssigkristallmoleküle 2.1 im wesentlichen vollständig zu den elektrischen Feldlinien auszurichten.

[0039] Damit eine erfindungsgemäße Vorrichtung wie die in Fig. 1 gezeigte als elektrisch steuerbarer Lichtstreuer wirken kann, ist es notwendig, daß das Medium 2 im wesentlichen für eine zu modulierende elektromagnetische Strahlung transparent ist.

[0040] Das Licht tritt dann durch das ebenfalls für diese Wellenlänge im wesentlichen transparente Substrat 1 und das Medium 2 hindurch. Durch das elektrische Feld wird infolge der Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle 3 eine Anisotropie im Brechungsindex oder der Dielektrizitätszahl  $\epsilon$  in dem Medium 2 erzeugt. Diese bewirkt eine polarisationsabhängige Verschiebung der Plasmonenresonanz der Partikel 3. Je nach der relativen Lage der eingestrahlen Lichtwellenlänge zu der Plasmonenresonanz kann also entweder die Plasmonenresonanz durch Anlegen des elektrischen Feldes in die eingestrahle Lichtwellenlänge oder aus dieser heraus geschoben werden. Im ersten Fall wird die Vorrichtung, die zuvor für die Lichtwellenlänge im wesentlichen vollständig transparent war, anschließend für diese Lichtwellenlänge fast undurchlässig, da das Licht an den Partikeln 3 absorbiert und gestreut wird. Im zweiten Fall schaltet die Vorrichtung von einem zuvor im wesentlichen undurchlässigen Zustand durch das Anlegen des elektrischen Feldes in einen für das Licht durchlässigen Zustand, da das Licht nicht mehr durch die Plasmonenresonanz der Partikel 3 absorbiert und gestreut wird.

## DE 101 35 114 A 1

7

[0041] Alternativ zu der in Fig. 1a, b gezeigten Ausführungsform können die Elektroden auch als transparente Elektroden, wie beispielsweise ITO-(Indiumzinnoxid-)Schichten ausgeführt und auf den Lichtein- und -austrittsflächen der Schicht 2 abgeschieden sein.

[0042] In Fig. 1a, b ist ein Zustand dargestellt, in dem die Flüssigkristallmoleküle 2.1 durch das elektrische Feld ausgerichtet sind. Wenn kein elektrisches Feld vorhanden ist, ist die Flüssigkristallschicht 10 in Domänen mit einem typischen Durchmesser von ca. 5 µm aufgeteilt, in denen die Moleküle 2.1 jeweils spontan in eine Richtung ausgerichtet sind.

[0043] In den Fig. 2a, b sind jeweils Streuspektren von Silber-Nanopartikeln zweier verschiedener Domänen vor und nach Anlegen des elektrischen Feldes dargestellt. Alle Streuspektren zeigen die Plasmonenresonanz als ein deutlich ausgeprägtes Maximum der gestreuten Lichtintensität in Abhängigkeit von der Photonenenergie bei etwa 2,5 eV. Die Materialzusammensetzung wird dabei mit polarisiertem Licht durchstrahlt und das dabei an den Partikeln 3 gestreute Licht wird in einem Glanzspektrometer spektral aufgelöst und anschließend durch eine CCD-Kamera detektiert.

[0044] Wie man sieht, ergibt sich ein unterschiedliches Verhalten der Plasmonenresonanz auf das Anlegen eines elektrischen Feldes F in den beiden Domänen. Während in dem in der Fig. 2a gezeigten Fall eine Verschiebung der Plasmonenresonanz zu niedrigeren Energien (Rotverschiebung) bei Anlegen des elektrischen Feldes erfolgt, zeigt sich in Fig. 2b eine Verschiebung zu höheren Energien (Blauverschiebung). In beiden Fällen ergibt sich für beispielhaft angenommene eingestrahle Photonenenergien von 2,25 und 2,8 eV (s. Pfeile) eine Zunahme der gestreuten Lichtintensität, womit die prinzipielle Eignung der Vorrichtung als elektrisch steuerbarer Lichtstreuer gezeigt ist. Entscheidend für das unterschiedliche Verhalten der Plasmonenresonanz ist ihre verschiedene spektrale Lage bei F = 0 in den beiden Domänen. Für die Ausgangslage der Plasmonenresonanz ist die relative Lage des Polarisationsvektors der eingestrahlt Lichtwelle zu der Richtung der spontanen Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle 2.1 in den Domänen von Bedeutung.

[0045] Derselbe Sachverhalt kommt in Fig. 3 zum Ausdruck. Hier ist das bei einer Domäne gemessene Maximum der Plasmonenresonanz in Abhängigkeit von dem Polarisationswinkel des eingestrahlt Lichts jeweils für F = 0 und F > 0 dargestellt. Bei bestimmten Polarisationswinkeln ergibt sich eine Blauverschiebung der Resonanz, während bei anderen Polarisationswinkeln eine Rotverschiebung der Plasmonenresonanz resultiert.

[0046] In Fig. 4 ist als eine mögliche Anwendung ein Lichtwellenleiter 30 schematisch dargestellt, in den ein erfindungsgemäßer elektrisch steuerbarer Lichtstreuer integriert ist. Mit diesem kann gezielt und selektiv eine bestimmte Wellenlänge aus dem Spektralbereich der in dem Wellenleiter geführten und durch den Lichtstreuer hindurchtretenden elektromagnetischen Strahlung in ihrer Intensität abgeschwächt und zur Seite herausgestreut werden. Wenn also wie dargestellt, die Intensität dieser Wellenlänge 10 beträgt, so beträgt die transmittierte Intensität nach Passieren des elektrisch steuerbaren Lichtstreuers bei dieser Wellenlänge I<sub>1</sub>, während die aus dem Wellenleiter 30 herausgestreute Intensität bei dieser Wellenlänge mit I<sub>2</sub> bezeichnet ist.

[0047] Wahlweise können die Elektroden des Lichtstreuers aus einem transparenten Material gefertigt sein, um die nutzbare Intensität des herausgestreuten Lichts zu steigern.

[0048] In der Fig. 5 ist als eine weitere Anwendung ein vollfarbtauglicher Bildschirm 40 schematisch dargestellt.

8

Dieser weist einen zweidimensionalen Wellenleiter 41, wie beispielsweise eine Glasplatte auf, in deren zwei gegenüberliegende Seitenkanten rotes, grünes und blaues Licht eingekoppelt wird, welches beispielsweise durch geeignet angeordnete LEDs oder Laserdioden emittiert werden kann. Auf eine Hauptoberfläche des Wellenleiters 41 ist eine regelmäßige Anordnung von Pixelelementen 43 aufgebracht, die jeweils aus einer Gruppe von Subpixeln 43.1, 43.2 und 43.3 für das Herausstreuen von rotem, grünem und blauem Licht ausgeführt sind. Die in diesen Subpixeln 43.1, 43.2 und 43.3 enthaltenen Materialzusammensetzungen und ihre jeweiligen Partikel sind so beschaffen, daß sie im roten, grünen und blauen Spektralbereich elektrisch gesteuerte Lichtstreuung erlauben. Die Subpixel können unabhängig voneinander mit Spannungen U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub> und U<sub>3</sub> angesteuert werden.

[0049] Ein Teil des in den Wellenleiter 41 eingekoppelten Lichts gelangt durch Vielfachreflexion an die mit den Pixelelementen 43 belegte Hauptoberfläche und damit in die Materialzusammensetzungsschichten der einzelnen Subpixel. Dort wird je nach der angelegten Spannung, die aus einem dem Bildschirm zugeführten Bildsignal entnommen wird, ein bestimmter Anteil des roten, grünen oder blauen Lichts herausgestreut. Wenn an keinem der Subpixel eines Pixelelements eine Spannung anliegt, so findet keinerlei Lichtstreuung statt, weil keine der eingekoppelten drei Wellenlängen mit den Plasmonenresonanzen der drei Materialzusammensetzungen der Subpixel zusammenfällt oder überlappt. Das Pixelelement ist also dunkel. Wenn das Pixelelement rotes Licht emittieren soll, so wird dem roten Subpixel über das Bildsignal eine Spannung zugeführt, so daß sich seine Plasmonenresonanz zu der Wellenlänge des roten Lichts verschiebt. Es wird dann von den angebotenen drei Wellenlängen nur das rote Licht herausgestreut. Wenn beispielsweise zusätzlich das eine andere Materialzusammensetzung aufweisende grüne Subpixel elektrisch aktiviert wird, so verschiebt sich seine Plasmonenresonanz zu der Wellenlänge des grünen Lichts, so daß rotes und grünes Licht herausgestreut werden, wodurch sich durch additive Farbmischung ein gelber Farbeindruck dieses Pixelelements ergibt.

[0050] Alternativ zu der vorbeschriebenen Ansteuerung der Subpixel kann diese auch derart erfolgen, daß bei Vorhandensein eines elektrischen Feldes die Plasmonenresonanz der entsprechenden Materialzusammensetzung nicht mit einer der bereitgestellten roten, grünen oder blauen Wellenlängen zusammenfällt und erst bei Abschalten des elektrischen die Verschiebung der Plasmonenresonanz ein derartiges Zusammenfallen bewirkt.

[0051] Alternativ zu der gezeigten Ausführungsform kann auch vorgesehen sein, daß die Pixelelemente als eine Zwischenschicht in den Wellenleiter 41 integriert werden, damit ein größerer Anteil des von außen in den Wellenleiter 41 eingekoppelten Lichts in die Materialzusammensetzungen der einzelnen Subpixel gelangen kann.

[0052] Es kann auch vorgesehen sein, daß die drei verschiedenfarbigen Subpixel jedes Pixelelements nicht nebeneinander sondern in einer Art Sandwich-Anordnung in vertikaler Richtung übereinander angeordnet sind. Diese Anordnung sollte von unten nach oben in der Reihenfolge Rot, Grün, Blau erfolgen, um auszuschließen, daß das aus einem Bereich herausgestreute Licht durch die jeweils anderen Bereiche geschwächt wird.

[0053] Der Bildschirm 40 kann auch als monochromer Bildschirm ausgeführt sein, indem die Pixelelemente einseitig aufgebaut sind, und Licht einer Wellenlänge oder eines relativ schmalen Wellenlängenbereichs in die Seitenkanten des Wellenleiters 41 eingekoppelt wird.

[0054] In der Fig. 6 ist eine alternative Ausführungsform



## DE 101 35 114 A 1

9

eines erfindungsgemäßen Bildschirms in einer partiellen Querschnittsansicht dargestellt, aus der ersichtlich wird, daß das Licht nicht notwendigerweise seitlich in den Wellenleiter eingekoppelt werden muß. Ein Bildschirm 50 kann auch einen Wellenleiter 51 aufweisen, durch dessen ebene Substrat-Rückseite das Licht eingekoppelt wird, und der kleine pyramiden- oder rillenförmige Vertiefungen 52 aufweist, an deren innerer Oberfläche das eingekoppelte Licht totalreflektiert wird. Die Darstellung zeigt einen Ausschnitt des Bildschirms 50 entlang einer durch zwei Vertiefungen 52 verlaufenden Ebene. Die Vertiefungen 52 sind mit Schichten von Materialzusammensetzungen beschichtet, in denen erfindungsgemäß Partikel 3 eingebettet sind. Bei der Totalreflexion entsteht ein evaneszentes Feld, welches in die Materialzusammensetzungsschichten hineinreicht und aus dem heraus Licht mit der gewünschten Farbe in alle Ausbreitungsrichtungen und somit auch nach vorne in die Richtung des Betrachters gestreut wird. Ein polychromer Bildschirm kann in an sich bekannter Weise so konzipiert werden, daß die Vertiefungen sich rillenförmig in einer von zwei orthogonalen Richtungen über die gesamte Oberfläche parallel zueinander erstrecken und in alternierender Weise mit "roten", "grünen" und "blauen" Materialzusammensetzungen beschichtet sind, wobei dann ein Pixelelement durch drei nebeneinanderliegende Subpixel gebildet wird. Die Vertiefungen 52 können jedoch auch punktförmig ausgedehnt sein, so daß die Pixelelemente als Farbtupel mit dreizählig angeordneten Subpixeln ausgeführt werden können. Die Elektroden zur Ansteuerung der Subpixel könnten beispielsweise auf den gegenüberliegenden Wänden der Vertiefungen 52 aufgebracht sein.

[0055] Als eine weitere Anwendung ist in der Fig. 7 eine im wesentlichen transparente Substratscheibe 60 wie eine (Fenster-) Glasscheibe oder eine Kunststoffscheibe schematisch dargestellt, die von hinten mit weißem Licht, beispielsweise Tageslicht durchstrahlt wird, und auf deren vorderer Hauptoberfläche ein erfindungsgemäßer elektrisch steuerbarer Lichtmodulator aufgebracht ist. Diese Anwendungsform entspricht also im wesentlichen der bereits in Fig. 1a, b gezeigten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Aus der Fig. 7 wird deutlich, daß man auf diese Weise elektrisch schaltbare Farbeffekte bei transparenten oder semitransparenten Glasscheiben herbeiführen kann. Es können mit der gezeigten Anordnung zwei verschiedene Farbzustände eingestellt werden, da je nach der spektralen Position der Plasmonenresonanz ein im wesentlichen der spektralen Breite der Plasmonenresonanz entsprechender Wellenlängenbereich aus dem eingekoppelten Weißlichtspektrum herausgestreut und absorbiert wird und damit ein um diesen Wellenlängenbereich reduziertes Weißlichtspektrum zu dem Beobachter gelangt. Wenn eine Spannung U angelegt wird, wird die Plasmonenresonanz und damit auch die spektrale Position des herausgestreuten und absorbierten Wellenlängenbereichs verschoben. Es kann auch vorgesehen sein, daß die Plasmonenresonanz im spannungslosen Zustand außerhalb des sichtbaren Spektralbereichs liegt und somit die Substratscheibe vollständig transparent ist, und erst bei Anlegen einer Spannung die Plasmonenresonanz in den sichtbaren Spektralbereich geschoben wird.

[0056] In ähnlicher Weise kann die erfindungsgemäße Vorrichtung auf eine Laserschutzbrille angewendet werden, bei der ein elektrisch steuerbarer Lichtstreuer jeweils auf einer der Hauptoberflächen der Brillengläser angeordnet ist. Eine solche Laserschutzbrille hätte den Vorteil, daß anders als bei herkömmlichen Laserschutzbrillen das Laserlicht nicht bei einer unveränderlichen Wellenlänge sondern bei einer wählbaren Wellenlänge abgeschwächt würde und somit äußerst vielseitig einsetzbar wäre.

10

## Patentansprüche

1. Materialzusammensetzung, in welcher in einem Medium (2), welches in einem Bereich elektromagnetischer Strahlung transparent ist, ein oder eine Mehrzahl von Partikeln (3) eingebettet ist, welche derart beschaffen sind, daß ihre frequenzabhängige Antwort auf die Einstrahlung elektromagnetischer Strahlung mindestens eine Resonanz, insbesondere eine Plasmonenresonanz, aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass das Medium (2) eine durch ein elektrisches Feld induzierbare oder veränderbare Anisotropie des Brechungsindex aufweist.
2. Materialzusammensetzung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Medium (2) durch das elektrische Feld austriebare Moleküle, insbesondere Flüssigkristall-Moleküle (2.1), aufweist.
3. Materialzusammensetzung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Medium (2) ein anorganisches elektrooptisches Material, insbesondere einen ferroelektrischen Kristall wie  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$  oder KDP aufweist.
4. Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Partikel (3) ein Metall, einen dotierten Halbleiter oder einen Supraleiter enthalten oder jeweils aus einer Kombination dieser Materialien aufgebaut sind.
5. Materialzusammensetzung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Partikel zur Gänze aus einem Metall, insbesondere aus Gold, Silber, Kupfer oder einem Alkalimetall zusammengesetzt sind.
6. Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Partikel (3) einen mittleren Durchmesser in einem Bereich zwischen 1 und 1000 nm aufweisen.
7. Materialzusammensetzung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Partikel (3) einen mittleren Durchmesser in einem Bereich zwischen 1 und 500 nm aufweisen.
8. Materialzusammensetzung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Partikel (3) einen mittleren Durchmesser in einem Bereich zwischen 1 und 200 nm aufweisen.
9. Materialzusammensetzung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Partikel (3) einen mittleren Durchmesser in einem Bereich zwischen 1 und 100 nm aufweisen.
10. Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Partikel (3) eine sphärische, ellipsoide oder stäbchenförmige Form aufweisen.
11. Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Materialzusammensetzung als eine Schicht (10) auf ein Substrat (1) aufgebracht ist.
12. Vorrichtung, insbesondere elektrisch steuerbarer Lichtmodulator, in welcher eine Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 11 enthalten und eine diese Materialzusammensetzung durchsetzendes elektrisches Feld erzeugbar ist.
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, gekennzeichnet durch zwei voneinander beabstandete und an eine Spannungsquelle anschließbare Elektroden (20), deren Zwischenraum mindestens teilweise durch die Materialzusammensetzung ausgefüllt ist.

## DE 101 35 114 A 1

11

12

14. Vorrichtung nach Anspruch 13 in Verbindung mit einer Materialzusammensetzung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (20) auf die Schicht (10) der Materialzusammensetzung aufgebracht sind. 3
15. Lichtwellenleiter (30), in welchen eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14 derart integriert ist, daß eine in dem Lichtwellenleiter (30) geführte elektromagnetische Welle durch die Materialzusammensetzung hindurchtritt. 10
16. Bildschirm (40, 50) mit einer Mehrzahl von regelmäßig angeordneten Pixelelementen (43), die jeweils durch eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14 gebildet sind. 15
17. Bildschirm (40, 50) nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Pixelelemente (43) auf oder in einem gemeinsamen Substrat (41, 51) angeordnet sind, in welches Licht mit einer Wellenlänge oder in einem Wellenlängenbereich einkoppelbar ist, welches durch die Pixelelemente (43) aus der Substratebene herausgestreut werden kann. 20
18. Bildschirm nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass er als monochromer Bildschirm ausgeführt ist, wobei Licht im wesentlichen einer Wellenlänge oder eines relativ schmalen Wellenlängenbereichs bezüglich des sichtbaren Spektralbereichs einkoppelbar ist. 25
19. Bildschirm (40, 50) nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass er als polychromer Bildschirm (40, 50) ausgeführt ist, bei welchem die Pixelelemente (43) jeweils aus drei Subpixeln (43.1, 43.2, 43.3) für die Farben Rot, Grün und Blau aufgebaut sind, Licht einkoppelbar ist, welches zumindest rote, grüne und blaue Spektralannteile enthält. 30
20. Substratscheibe (60), insbesondere Glas- oder Kunststoffscheibe, auf deren einer Hauptoberfläche eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14 aufgebracht ist. 35
21. Laserschutzbrille, bei welcher auf jeweils einer Hauptoberfläche der Brillengläser eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14 aufgebracht ist. 40

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

50

55

60

65



ZEICHNUNGEN SEITE 1

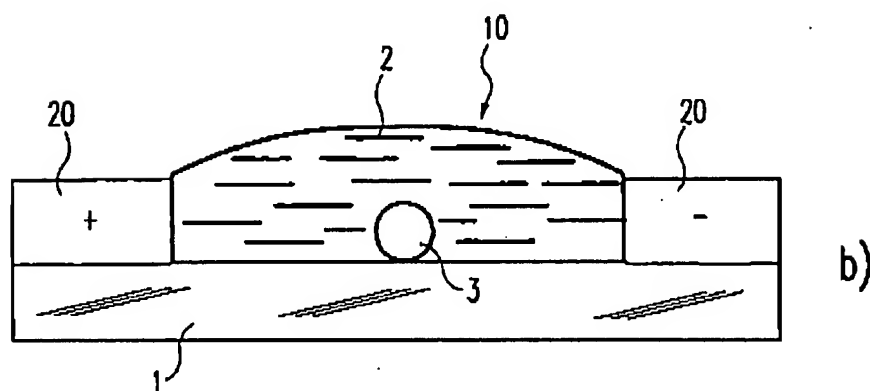
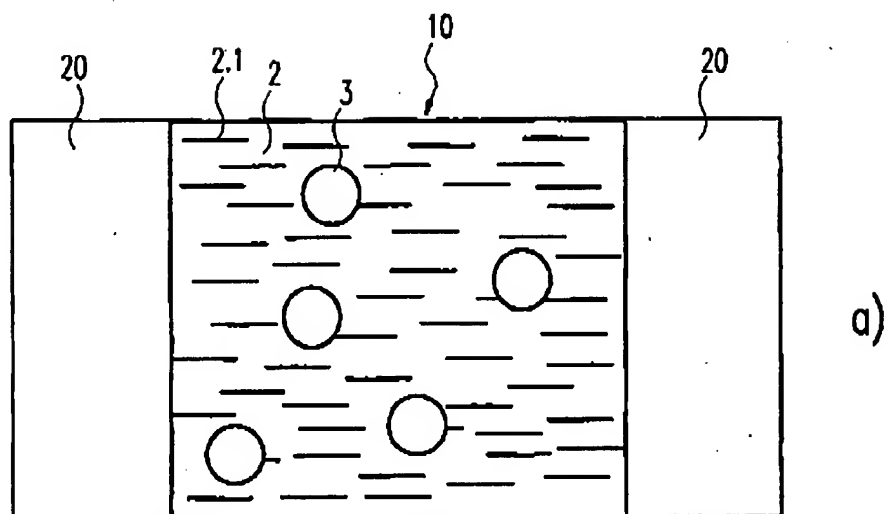
Nummer:  
Int. Cl.7:  
Offenlegungstag:DE 101 35 114 A1  
C 09 K 19/02  
13. Februar 2003

Fig. 1

ZEICHNUNGEN SEITE 2

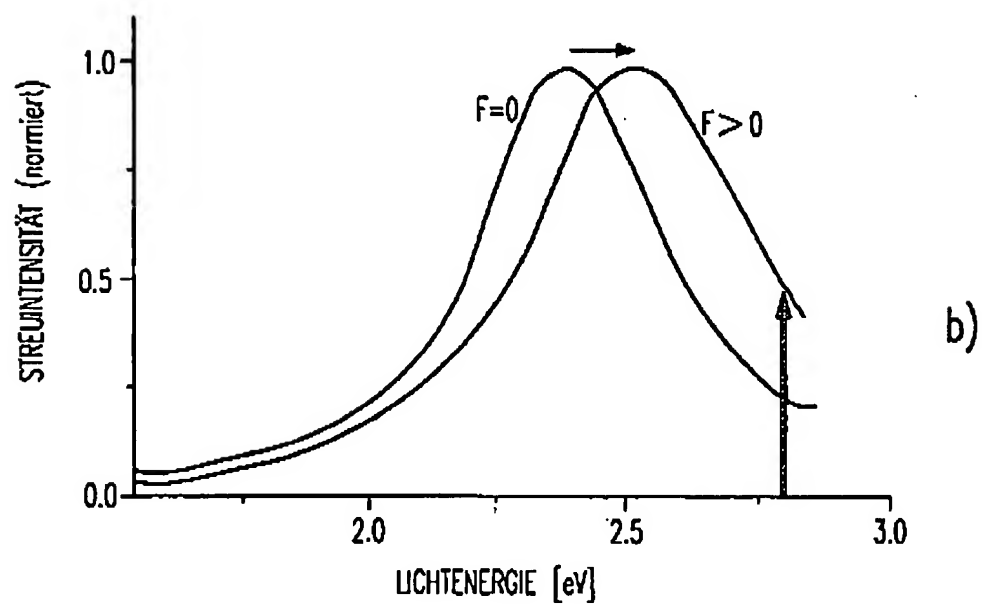
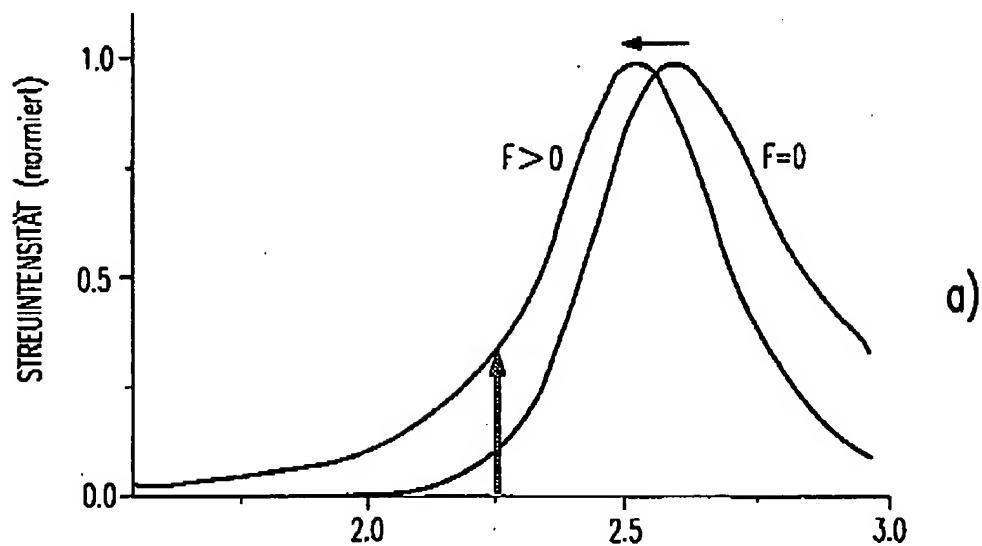
Nummer:  
Int. Cl.7:  
Offenlegungstag:DE 101 35 114 A1  
C 09 K 19/02  
13. Februar 2003

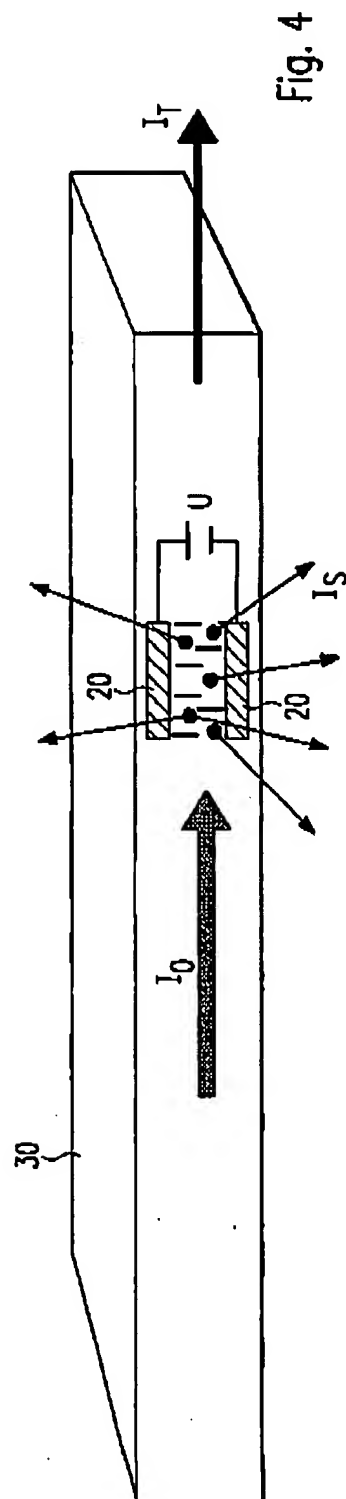
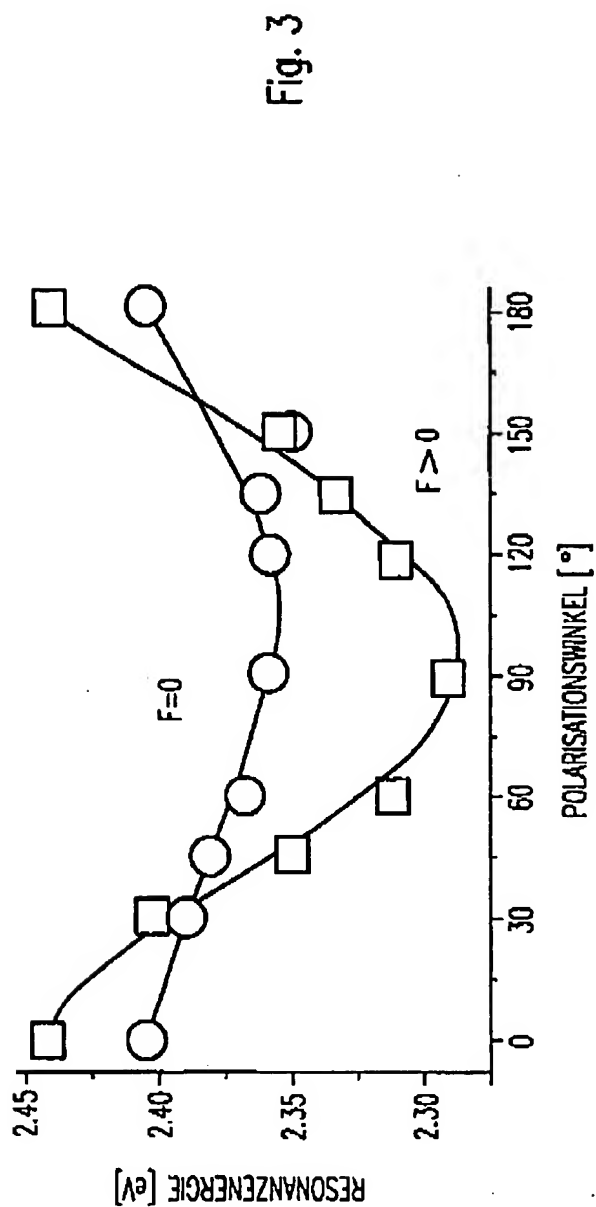
Fig. 2

102 670/124

ZEICHNUNGEN SEITE 3

Nummer:  
Int. Cl.7:  
Offenlegungstag:

DE 101 35 114 A1  
C 09 K 19/02  
13. Februar 2003



102 670/124

ZEICHNUNGEN SEITE 4

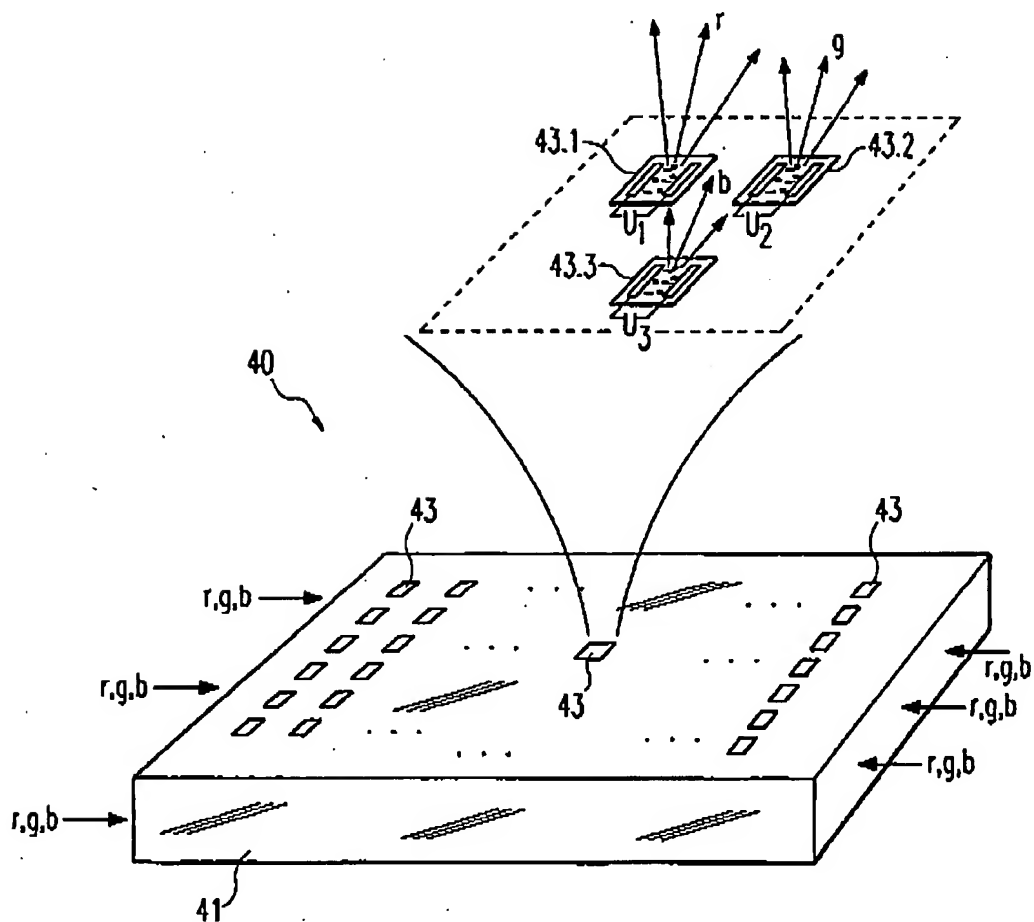
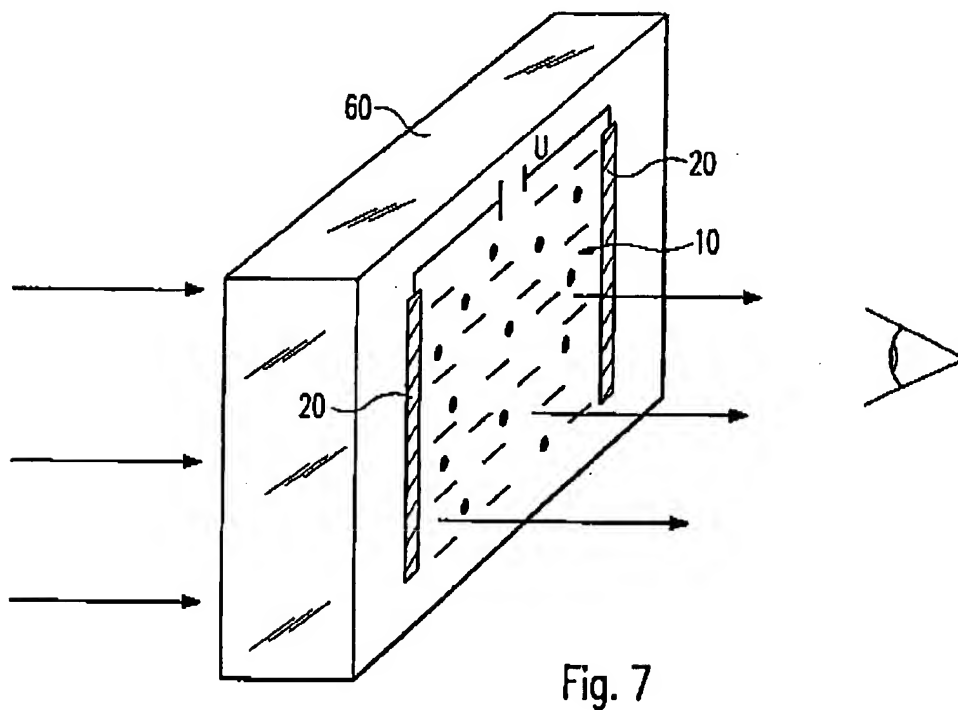
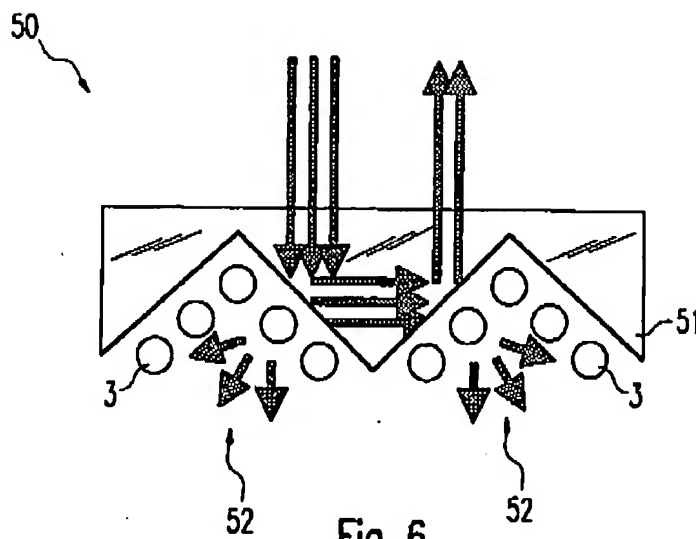
Nummer:  
Int. Cl. 7:  
Offenlegungstag:DE 101 35 114 A1  
C 09 K 19/02  
13. Februar 2003

Fig. 5

ZEICHNUNGEN SEITE 5

Nummer:  
Int. Cl. 7:  
Offenlegungstag:DE 101 35 114 A1  
C 09 K 19/02  
13. Februar 2003

102 570/124